

*LES SABLES RONDS-MATS,
ÉMOUSSÉS-LUISANTS ET NON USÉS
OBSERVÉS
AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE A BALAYAGE
(STEREOSCAN)*

Par GEORGES BUSSON

On sait tout l'intérêt que présente la distinction des sables par la morphoscopie, en particulier par la forme et les aspects de surface. En France, A. CAILLEUX a beaucoup œuvré pour définir les principales classes (émoussés-luisants ; ronds-mats ; non usés, etc.), pour préciser les conditions et les facteurs de leur genèse et pour montrer l'intérêt paléogéographique de ces notions. Je rappellerai en quelques mots la description des principaux types qu'ont donnée, récemment encore, A. CAILLEUX et J. TRICART, description basée sur les caractères visibles à la loupe binoculaire.

1) Les grains émoussés-luisants combinent un contour général aux arêtes émoussées ou même arrondies et une surface d'un poli plus ou moins parfait : ce dernier caractère permet au grain observé à la binoculaire de fournir par réflexion une image très nette de la source lumineuse, et, en outre, une ou plusieurs images après réfraction. La transparence de tels grains peut être très grande. Du point de vue interprétation, il s'agirait de « grains usés dans l'eau, à la suite d'un long frottement, avec roulement ».

2) Les grains ronds-mats sont en moyenne plus sphériques encore que les précédents ; « la surface du grain est entièrement dépolie, picotée, constellée de minuscules marques de choc en coups d'angle, en croissants, en écaillures ou en cupules de 0,01 mm ou moins ». L'absence de poli, qui entraîne une absence de transparence, ne permet pas la formation d'une image par réflexion mais sous la source lumineuse, tout le grain paraît clair. Bref, l'aspect mat est fondamental et ce sont toutes les marques de choc qui en sont à l'origine. D'après A. CAILLEUX, cet aspect provient de chocs dans l'air, causé par l'impact des grains les uns contre les autres sous l'effet du vent.

3) Les grains non-usés ont un contour en général anguleux ; ils conservent des portions de faces originelles du cristal et présentent des cassures, plus ou moins irrégulières.

Cette classification a servi de cadre à de très nombreuses observations et des travaux abondants en ont montré le bien-fondé et l'intérêt.

En fait si l'unanimité est à peu près réalisée sur le lien entre ces classes et les

milieux qui les ont façonné¹, il n'en est pas de même des *processus* mis en jeu pour arriver à ce résultat. En particulier, Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK (1962) ont rejeté l'hypothèse suivant laquelle ces états de surface (mat, luisant) ont été engendrés par des actions mécaniques. Dans le cas des grains mats, l'observation principale invoquée par ces auteurs pour nier l'importance des chocs est la suivante : les surfaces sont souvent dépolies jusque dans les recoins les plus profonds et les plus reculés qui indentent le grain, ce qui n'est pas compatible avec une genèse mettant en jeu les impacts des grains les uns contre les autres. Et Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK invoquent, pour expliquer la matité, une attaque chimique dont l'agent serait la rosée. De même la réalisation de grains luisants ne serait pas due à une usure mécanique, mais à des processus physico-chimiques favorisant en premier lieu la croissance du réseau cristallin du grain mis en cause, c'est-à-dire à des phénomènes de nourrissage.

Comme en bien d'autres domaines, l'utilisation du microscope électronique a été envisagée afin d'accroître le champ des observations possibles. Les premières réalisations ont été effectuées depuis six ou sept ans avec des microscopes électroniques à transmission. Les servitudes particulières de ce type d'appareil ont posé des problèmes nouveaux : les grossissements extrêmement élevés, l'obligation d'observer une réplique à l'exclusion de l'objet lui-même interdisaient toute vue globale du grain ; en règle générale, les *informations fournies se situaient dans un domaine pratiquement sans relation avec les observations faites jusqu'alors à la binoculaire*. D'où bien des difficultés et bien des tâtonnements. Rappelons brièvement quelques étapes de ces recherches. Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK (*op. cit.*) parmi les premiers ont affronté ces problèmes « *it turns out to be very difficult to interpret the images one obtains even when these are on stereoscopic.* » Les clichés qu'ils publient sont à des grossissements de 7.000 et de 19.000. Les principaux résultats portent sur la présence de débris divers, de nature incertaine (kaolinite ?, attapulgite ?, feldspath ?) à la surface des grains mats ; alors que les grains de rivière en sont dépourvus. En outre, ces auteurs n'ont pas observé de marques circulaires de quelques microns de diamètre : ils en tirent un argument supplémentaire contre les théories de A. Cailleux.

Dans une note de la même année, D. KRINSLEY et T. TAKAHASHI ont publié des électromicrographies, toutes prises à un grossissement de 5.000 : les grains des dunes leur paraissent caractérisés par des « crêtes méandriformes qui résultent de l'intersection de surfaces courbes conchoïdales ». Et ces surfaces courbes sont interprétées comme des éclats, sautés sous le choc d'autres particules. Quant aux grains de plage, ils ne montrent qu'une structure de surface : de petites indentations pyramidales qui apparaissent sur le cliché comme un réseau de figures en forme de V (*V shaped patterns*). Ici se remarque clairement une caractéristique de ces observations issues d'un moyen *très puissant* eu égard à l'objet étudié : les auteurs ne font plus allusion qu'aux microcavités, développées à la surface du grain, parce que celles-ci sont à l'échelle des clichés fournis par le microscope électronique ; il n'est même plus question du *poli* de la surface qui reste pourtant le trait essentiel, spécifique de ces grains, à la fois le plus remarquable et le moins facile à expliquer.

Toujours en 1962, E. W. BIEDERMAN donne un cliché (fig. 5) assez difficile à interpréter où se verrait « la surface irrégulièrement cavitée, caractéristique

1. Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK rappellent que SIDENKO (*in STRAKHOV, 1957*) considère que l'érosion par le vent donne des grains à surface polie et que de ce fait les grains dépolis sont rares parmi les grains éoliens. Mais il s'agit là d'une opinion tout à fait isolée.

de sable éolien ». Le texte ne projette pas de lumière particulière, car on y lit que ces cavités mesurent 100 à 1.000 Å, ce qui leur fait, à l'échelle de la photo, 0,5 à 0,05 mm ! Par contre, les photos de grains déposés par l'eau sont très spectaculaires ; les cavités triangulaires régulières, dont les rapports avec les formes cristallographiques paraissent indiscutables, sont imputées à des dissolutions. J. J. PORTER (1962) insiste sur l'importance du choix du grossissement dans les résultats et les interprétations que fournit le microscope électronique.

Enfin, tout récemment C. J. A. SOUTENDAM (1967) a publié une étude portant sur des grains éoliens et des grains fluviatiles. Les grains éoliens ont montré une surface uniformément usée, avec des structures extrêmement fines ; seuls quelques grains ont montré des marques polygonales, irrégulières et grossières. La fine texture de surface qui serait typique de grain désertique est imputée à la rosée ; la marque plus grossière représenterait seule un impact dû aux actions éoliennes. Sur les sables de rivière a été reconnu, une fois encore, le réseau de petites cavités triangulaires.

La voie expérimentale constitue une autre approche du problème, qui a tenté beaucoup de chercheurs : je ne rappellerai pas tous les dispositifs réalisés pour user du matériel quartzéux, ni le détail des résultats obtenus par chacun. Globalement les conclusions apparaissent souvent contradictoires : avec Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK l'abrasion éolienne artificielle n'aboutit pas à un dépoli analogue à celui des grains mats naturels ; tandis qu'avec D. KRINSLEY et T. TAKAHASHI, les produits réalisés sont tout à fait comparables aux grains naturels. Davantage, avec les premiers auteurs, le transport fluvial expérimental tend à dépolir les grains, au moins sur les parties en relief ; alors qu'avec les seconds, les grains artificiels sont analogues aux grains de plage naturels jusque dans le détail du réseau d'indentation en forme de V. L'apport de ces expériences reste donc assez limité.

Il semblait légitime de penser que l'observation de ces différents types de grains au microscope à balayage ne se heurterait pas aux mêmes difficultés que celle réalisée avec les appareils à transmission. Certes, on perd toujours un caractère, par rapport à la binoculaire, c'est le degré de transparence. Car le quartz quelque soit son état de surface est toujours un mur impénétrable aux électrons. Mais, à part cette unique lacune, les avantages sont nombreux : possibilité d'observer le grain lui-même et non la réplique d'une petite fraction de sa surface, possibilité de partir de très faibles grossissements (20) jusqu'à des valeurs très élevées (de l'ordre de 20.000 ou plus) ; bref, l'ensemble permet de commencer par une vue rappelant très étroitement celle donnée par une binoculaire pour finir par l'examen de détail d'une portion minuscule. Voyons les résultats obtenus sur différents types de grain¹.

1) LES GRAINS RONDS-MATS (Pl. I, fig. 1 à 8). — Les sables étudiés proviennent de sables de dunes actuels prélevés dans le Djoua, aux confins de la hamada de Tinrhert et de l'erg Issaouane. Les grains choisis dans la gamme de taille moyenne de l'échantillon, à savoir avec un diamètre de 0,5 mm, ont été examinés après avoir subi une métallisation de la surface.

La première série observée est constituée de grains bruts, n'ayant subi aucun traitement préalable. Au grossissement 55 (Pl. I, fig. 1) et 60 (Pl. I, fig. 5), l'image

1. Les différents traitements appliqués à ces sables, leur préparation pour l'observation au microscope électronique et toutes les électromicrographies (y compris les quelques-unes publiées, ci-joint) ont été réalisées par M^{lle} Denise NOËL, sans la collaboration de laquelle je n'aurais pas pu mener à bien cette étude. Je lui exprime donc ici mes remerciements.

est comparable à celle obtenue à la binoculaire. On notera tout d'abord l'allure générale sphérique qui n'est accidentée que par quelques dépressions, de forme allongée ; celles-ci correspondant vraisemblablement à des rentrants sur le fragment du quartz original — analogues à celles qui s'observent sur le grain non usé de la fig. 5, Pl. II. — Ces dépressions ne seront oblitérées que lorsque l'usure aura enlevé une couronne sphérique d'épaisseur égale ou supérieure à leur profondeur maximale. En ce qui concerne l'état de surface, on remarquera l'aspect *piqué* déjà net à cette échelle ; tous les grains sahariens examinés apparaissent ainsi criblés de minuscules dépressions circulaires. Malgré l'absence des phénomènes liés à la transparence, le contraste entre les ronds-mats et les émoussés-luisants (Pl. II, fig. 1) est aussi net qu'à la binoculaire à grossissement égal.

A des grossissements plus élevés — Pl. I, fig. 2 ($\times 270$), fig. 3 ($\times 530$) — la surface se révèle extrêmement rugueuse, d'aspect bosselée ou même martelée. C'est une juxtaposition de creux et de reliefs, de disposition anarchique, d'importance à peu près égale. L'ensemble est aussi irrégulier que peut l'être la surface de l'eau animée d'un léger clapotis et l'opacité de ces grains, en observation optique, est un phénomène du même ordre que l'opacité de la surface de la mer légèrement agitée, laquelle fait place, on le sait, à une transparence remarquable si l'on pose sur cette surface naturelle une simple plaque de verre. Mais, en outre, dès un grossissement de 1.000 et bien plus à des valeurs plus élevées (fig. 4, Pl. I, $\times 2.700$) on constate l'extrême abondance de débris fixés sur le grain, conformément à ce qui a déjà été signalé par de nombreux auteurs. Malgré la très petite taille de ces débris (un demi-micron en moyenne), il est probable que leur présence n'est pas négligeable quant au comportement des surfaces qu'ils revêtent et il a paru souhaitable de reprendre les observations avec des grains nettoyés.

Une série de sables du même échantillon a été donc plongée dans une solution d'hexametaphosphate de sodium pour aider à défloculer les particules argileuses, puis soumis à l'action des ultra-sons pendant un temps variable : cinq minutes pour une partie de ses grains, dix minutes pour les autres. Après ce traitement, la surface des grains apparaît avec un aspect assez différent : moins irrégulière d'abord et, ensuite, nettement marquée de dépressions circulaires ou hémicirculaires. Ces dépressions, dont le diamètre mesure 5 à 10 μ , sont en effet le plus souvent en *croissant* (Pl. I, fig. 8, $\times 3.000$) : bord franc, abrupt approximativement sur un demi-cercle, le reste de la circonférence n'étant que peu ou pas marqué. On constate parfois (Pl. I, fig. 8) que le fond de ces dépressions est particulièrement irrégulier, comme si le quartz y était crevassé, brisé, fragmenté : on peut penser qu'il faut voir là l'effet de l'impact même qui a creusé cette dépression.

En conclusion, on constatera que les images de surface obtenues sur ces grains ronds-mats ne semblent nullement compatibles avec l'hypothèse d'une genèse par attaque chimique. Les grossissements les plus élevés mis en œuvre sur des grains nettoyés par traitement aux ultra-sons, montrent des figures en général hémicirculaires qui fournissent une image extrêmement détaillée de *dépressions de percussion*. Ainsi se trouvent confirmées et précisées les hypothèses déjà anciennes émises par A. Cailleux. Un autre point d'une certaine importance est évoqué par l'effet des ultra-sons. La différence entre les images obtenues sur grain non traité et sur grain traité semble difficilement pouvoir être imputée seulement à des impuretés argileuses, ferrugineuses, etc. fixées sur la surface (A. M. СЕКНОМСКИ, 1960). D'ailleurs J. J. PORTER identifiant le résidu arraché

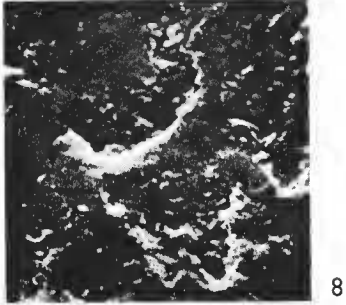
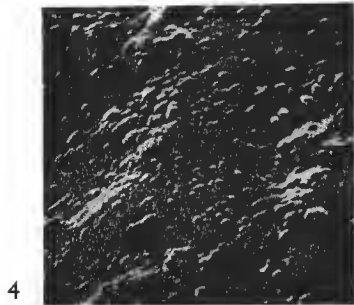
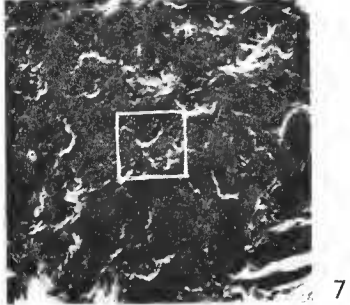
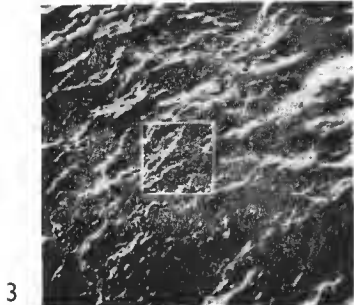
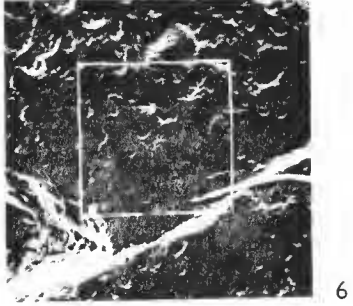
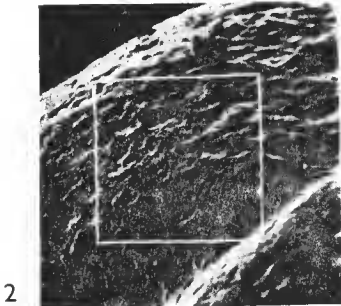
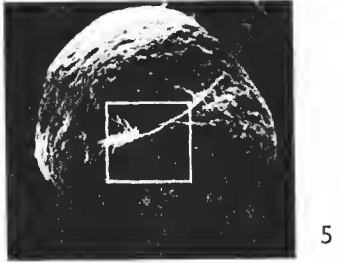
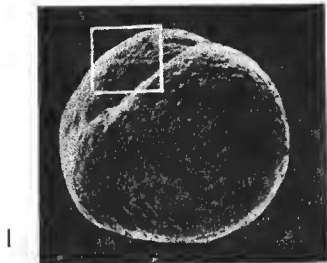
à des sables ainsi soumis à un traitement d'ultra-sons mettait en évidence 80 % de kaolin et 20 % de quartz seulement après dix minutes de traitement ; mais 80 % de quartz et 20 % de kaolin après une action de quatre vingt minutes. Si l'on se souvient que les ultra-sons sont couramment utilisés pour dégager et nettoyer des microfossiles particulièrement fragiles, il est permis de penser que même une action prolongée pendant quatre vingt minutes ne s'est pas attaquée à la partie saine du quartz ; mais que ces grains ronds-mats, soumis à des chocs incessants depuis des millénaires finissent par être entièrement recouverts d'une couche où le quartz est pulvérisé, fragmenté ou au moins fissuré au-dessus de la partie saine, interne. Ce serait cette partie brisée ou au moins fissurée qui serait dégagée plus ou moins profondément par le traitement aux ultra-sons. Et la présence d'une telle *gangue* ne peut que renforcer l'aspect mat du grain, considéré optiquement.

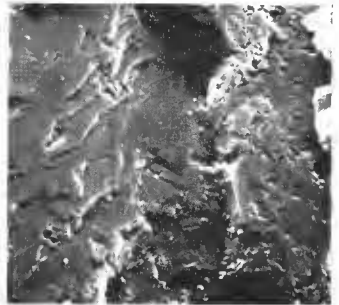
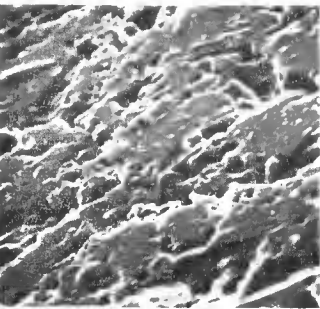
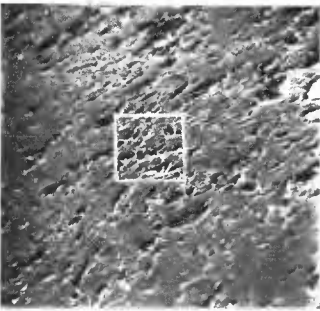
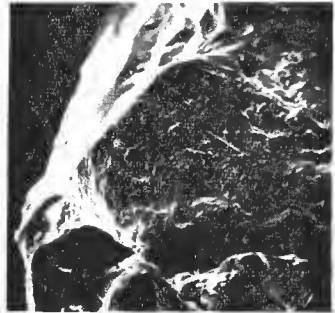
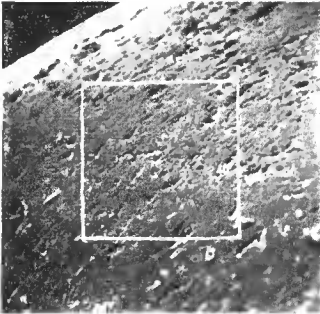
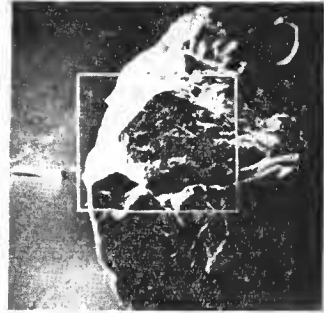
2) LES GRAINS ÉMOUSSÉS-LUISANTS (Pl. II, fig. 1 à 4). — Les grains émoussés-luisants qui ont été examinés sont des sables de plages de Rio-de-Janeiro, échantillons dont l'intérêt a été mis en évidence par A. CAILLEUX et qui font partie de la collection de référence mise en vente par la Maison Boubée. Il ne s'agit pas de grain d'un type moyen parmi les émoussés-luisants mais d'exemplaires exceptionnels parmi les plus beaux connus. Sur la fig. 1, Pl. II, prise au grossissement 40 se note à la fois l'émoussé très poussé d'un de ces grains et, en même temps, l'extrême poli de sa surface. Certes aux grossissements plus élevés (fig. 2, Pl. II, $\times =$; fig. 3, $\times 490$) cette surface est loin d'apparaître comme un plan parfait ; le grossissement 2.500 (fig. 4) montre même un relief assez saisissant. Mais, au contraire des grains ronds-mats, ces accidents de la surface ne sont jamais que des accidents *en creux*. Il s'agit en somme d'une surface, percée de trous, mais néanmoins parfaitement plane car elle ne présente *aucune protubérance*, aucun relief qui la domine. C'est cette planéité qui explique le comportement de la surface de ces grains à l'égard de la lumière : à la fois le fait d'être luisant et leur transparence remarquable. Quant aux cavités creusées dans cette surface, elles correspondent approximativement aux figures décrites par divers auteurs : *triangular pits* de C. J. A. SOUTENDAM ou *small pyramidal indentations which appear as V shaped patterns*. Elles sont toutefois moins typiquement triangulaires que sur certaines photos de répliques fournies par ces auteurs et, en tout cas, elles ne montrent pas les mêmes relations évidentes avec le réseau cristallographique du grain que les photos publiées par E. W. BIEDERMAN. Que peut-on penser des conditions de genèse de ces grains ? Les cavités semblent avoir été causées par des phénomènes de dissolution. Quant au trait le plus caractéristique, le poli de la surface, il paraît difficile de l'imputer, comme l'ont

LÉGENDE DE LA PLANCHE I

Grains ronds-mats, sables actuels du Djoua, Hamada de Timhert (Sabara).

1. — sable brut. Grain entier $\times 55$.
2. — détail de la zone encadrée sur la fig. 1 et bord du grain, $\times 270$
3. — détail de la zone encadrée sur la fig. 2, $\times 530$
4. — détail de la zone encadrée sur la fig. 3, $\times 2700$
5. — sable traité 5 minutes aux ultra-sons (40 K.C.). Grain entier $\times 60$
6. — détail de la zone encadrée sur la fig. 5, $\times 300$
7. — détail de la zone encadrée sur la fig. 6, $\times 600$
8. — détail de la zone encadrée sur la fig. 7, $\times 3000$.





fait Ph. H. KUENEN et W. G. PERDOK, à des processus physicochimiques mettant en jeu la croissance du cristal. On peut considérer comme plus vraisemblable que ce poli résulte de l'abrasion sous-aquatique. Dans la mesure où une comparaison avec changement d'échelle a une chance d'être fondée, on peut estimer que ce poli provient de l'usure, tout comme celui qui prend naissance sur un galet, qu'il soit de quartz, de calcaire ou de gneiss, longuement trituré sur une plage. Personne ne songe dans ce dernier cas à invoquer des phénomènes de croissance de cristal pour expliquer cet état de surface.

3) LES GRAINS NON USÉS. — Trois électromicrographies seulement sont présentées ici, faites sur des grains de la plage marine de Trez-Hir (Finistère, France) en provenance de la collection de référence de Boubée. Il ne s'agit pas en effet ici de mener une étude des grains non usés mais de fournir quelques exemples du comportement de tels grains observés dans les mêmes conditions que les précédents. On remarquera en particulier la présence de faces cristallines caractérisées par leur planéité, l'abondance des arêtes aiguës, l'importance des rentrants et des crevasses qui accidentent ces grains, l'existence de plans de cassure tout à fait typiques avec décrochement successif le long de la surface de cassure (Pl. II, fig. 7). Bien entendu les différences sont extrêmement accusées entre ce modèle et les précédents, puisque les exemples choisis sont des cas extrêmes, très caractéristiques.

Conclusions

Les quelques observations présentées ci-dessus n'ont que le caractère d'une étude préliminaire. Le microscope électronique à balayage présente l'énorme avantage de fournir des images à faible grossissement comparables à celles qui s'obtiennent à la binoculaire, tout en pouvant « monter » jusqu'à des grossissements très élevés (plusieurs dizaines de milliers de fois). Ainsi les caractères identifiés peuvent être reliés sans difficultés majeures aux observations faites préalablement à la binoculaire ; ce qui n'est pas toujours le cas des caractères étudiés au microscope électronique à transmission. L'étude morphologique particulièrement précise rendue possible par ce nouveau moyen d'investigation devra être généralisée afin de mieux définir les différents types de grains et d'états de surface. Après un inventaire poussé, il sera possible d'interpréter avec moins d'incertitude les cas peu typiques — si fréquents dans la nature — et il pourra être envisagé de reprendre avec des bases plus solides l'étude de la genèse de ces formes et de ces états de surface.

Laboratoire de Géologie du Muséum.

LÉGENDE DE LA PLANCHE II

FIG. 1 à 4 : grain émoussé-luisant, Plage de Rio de Janeiro (Brésil).

Fig. 1 : grain entier $\times 40$

Fig. 2 : bord du même grain à un grossissement plus fort $\times 240$

Fig. 3 : détail de la zone encadrée sur la fig. 2 $\times 490$

Fig. 4 : détail de la zone encadrée sur la fig. 3 $\times 2500$

FIG. 5 à 7 : grain non usé, Plage marine Trez-Hir (Finistère, France).

Fig. 5 : grain entier $\times 55$

Fig. 6 : détail de la zone encadrée sur la fig. 5 $\times 410$

Fig. 7 : détail d'un autre grain $\times 270$.

BIBLIOGRAPHIE

- BIEDERMAN, E. W. Jr., 1962. — Distinction of shoreline environments in New Jersey. *J. Sediment. Petrol.*, **32**, 2, pp. 181-200, fig. 1-20. Tulsa.
- CAILLEUX, A. et J. TRICART, 1959. — Initiation à l'étude des sables et des galets, vol. 1, 369 p., 72 fig. Paris (Centre de documentation universitaire).
- *CAILLEUX A. et M. SCHNEIDER, 1968. — L'usure des sables vue au microscope électronique à balayage. *Science Progrès La Nature*, n° 3395, pp. 92-94, Paris.
- CEKHOMSKIJ, A. M., 1960. — Structure et composition de la pellicule des grains des sables quartzeux. *Kora vyvetr. Akad. Nauk. SSSR.*, **3**, pp. 239-312. Traduction S. I. G. du BRGM (Paris) n° 4530.
- KRINSLEY D. et T. TAKAHASHI, 1962. — Applications of electron microscopy to geology. *Trans. N. Y. Acad. Sci.*, (2) **25**, pp. 3-22, 23 fig. New-York.
- KUENEN Ph. H. et W. G. PERDOK, 1962. — Experimental abrasion, frosting and defrosting of quartz grain. *J. Geol.*, **70**, 6, pp. 648-658, 2 pl., 1 fig., Chicago.
- PORTER, J. J., 1962. — Electron microscopy of sand surface texture. *J. Sediment. Petrol.*, **32**, 1, pp. 124-135, 7 fig. Tulsa.
- SOUTENDAM, C. J. A., 1967. — Some methods to study surface textures of sand grains. *Sedimentol.*, **8**, pp. 281-290, 12 fig., Amsterdam.

Le Gérant : Jacques FOREST.